

2 種類の車両を用いた SSMA に基づく橋梁健全性評価の可能性検討 FEASIBILITY STUDY OF BRIDGE HEALTH EVALUATION BASED ON SSMA BY EMPLOYING TWO-TYPE VEHICLES

二出川 真

Makoto NIDEGAWA

(指導教員 山本 亨輔)

Abstract- VRA (Vehicle Response Analysis) method for bridge health evaluation has been proposed. SSMA (Spatial Singular Mode Angle) is one of the proposed indices for VRA-based bridge screening. However, the existing method requires data for the intact status. Thus, in this study, the heavy and light two types of the passing vehicles are used to calculate SSMA to develop a new VRA method in which the bridge status can be evaluated without the intact case data. It is expected that the SSMA of heavy and light vehicles are same in the intact case, while they are different in the damage cases. This expectation is experimentally examined by using the laboratory vehicle and bridge models. It is found that they show different trends especially in the damage cases as the result; there exist the possibilities to evaluate bridge health by this proposed method.

1 はじめに

国土交通省によれば、現在日本には 2m 以上の橋梁がおよそ 70 万基以上存在^[1]している。その多くは 1960 年代の高度経済成長期に建設されたものであり、既に供用開始から 50 年近くが経過しつつある。したがって、経年劣化に対する適切な維持管理は以前にも増して重要となってきた。橋梁の点検方法は目視点検が一般的である。しかし、目視点検は技術者の主観的判断に依存し、熟練技術者は不足しがちである。橋梁保全業務に携わる土木技術者が全くいないという市区町村も一定の割合で存在している^[2]。

すべての橋梁を一律に点検するには、多くの費用・練度の高い技術人材・多大な時間と労力を要し、効率が悪い。限られたリソースを効率よく分配するため、橋梁群全体のスクリーニングに対する需要があると予想される。

橋梁スクリーニング手法として、車両応答分析に着目した研究がある^{[3][4]}。車両応答分析とは、走行車両の前・後車軸上に加速度センサを設置し、走行しながら間接的に橋梁振動を計測・分析し、橋梁の健全性を評価する移動型の簡易点検技術である。本研究では、橋梁振動の特性値としてモード形状に着目する。既往の研究成果より、橋軸方向及び橋軸直

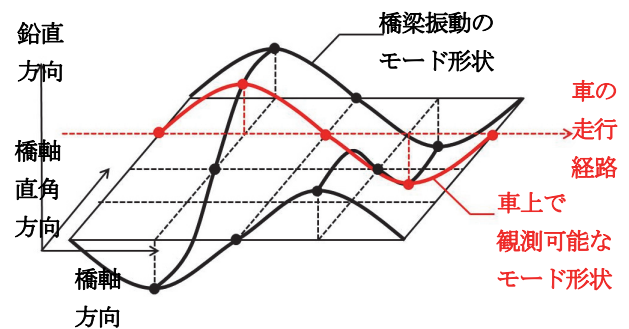


図-1 橋梁のモード形状

角方向からなる二次元空間において鉛直方向に定義される橋梁モード形状(図-1)は、損傷に対して感度が高いことが分かっている^[5]。しかし、車上センサは移動点であり、橋梁振動モードを推定する際には、車両移動の影響を考慮しなければならない。そこで、まず、基底関数を用いて車上の移動点で得られた計測値から、橋梁上の固定点で得られる振動を推定する。但し、この推定振動は多くの外乱に影響を受ける。たとえば、車両と橋梁が一体となって振動する場合を想定した場合であっても、路面凹凸が車両振動に及ぼす影響により、車両振動を橋梁振動と見なすことは難しい。加えて、車両はサスペンションを備えた力学的振動システムであり、橋梁と一体になって振動することもない。よって、この推定手法では橋梁モード形状は正しく推定できない。そこで、本研究ではこれを特に、空間特異モードと呼

称する。車上の移動点が2点（前・後車軸上）あることに対応して、空間特異モードを表す行列には独立変数が2つ含まれる。この2変数の比を単位円上にプロットし、その位相角をSSMA（Spatial singular Mode Angle：空間特異モード角）と呼称し、橋梁の損傷検知指標として用いる。

既往の研究では、SSMAが橋梁の損傷前後で感度よく変化することが示されており、橋梁のスクリーニング指標として可能性が認められる。

SSMAは車両のモード形状でも橋梁のモード形状でもなく、解析的にも不明な点が多い。したがって、ある橋梁について損傷検知が可能としても、全ての橋梁に適用できるとは限らない。ただし、SSMAは実橋梁・数値計算・模型実験のいずれにおいても、橋梁損傷に対して高い感度を示すことが確認されている^{[10][11]}。例えば、実際の鋼製トラス橋における斜材破断や、模型桁における部材取り外しによる損傷模擬実験では、SSMAに有意な差が見られる。ただし、車重は橋梁を十分に振動させる重さが必要で、軽車両ではSSMAの感度が下がるとされる^[12]。

既往の研究では、橋梁の健全時と損傷時でそれぞれ車両を走行させ、SSMAを比較することで損傷を検知している^{[9][10][11]}。しかし、実務において、橋梁の健全時データを確保することは困難である。よって、健全時データとの比較無しに、橋梁損傷を検知する技術が求められている。数値シミュレーションの結果によると、SSMAは車両の走行速度や橋梁の路面凹凸が変化に敏感であることが示されているが、車重による影響は少ないとされる^[12]。ただし、橋梁に損傷が生じた場合のみ、車重の影響を受ける。よって、軽量車と重量車のSSMAを比較したとき、両者が等しいまたは近い値を示す時は損傷無し、離れた値を示す時は損傷ありと判断できる可能性がある。

本研究では、損傷模擬が容易で、簡易に反復試行のできる模型実験を行い、重量の異なる車両を走行させたときのSSMAの挙動を確認する。結果に基づいてSSMAベースの車両応答分析を健全時データなしで適用できるように拡張を試みる。

2 SSMAの算出方法

一般に、モード解析理論で想定される橋梁振動の計測値は、固定点で得られるものである。一方、車両振動から推定される橋梁振動は、車両走行に伴って計測位置が時間変化する移動計測点での計測値である。そこで、本研究では基底関数を導入し、移動

計測点 $x = \tilde{x}(t)$ での計測値 $\tilde{y}(t)$ から、仮想した固定計測点 $x = \hat{x}_1, \hat{x}_2$ での推定値 $\hat{y}(t_s)$ を求める。

k 次のモード形状関数を $\phi_k(x)$ 、基準座標を $q_k(t)$ とおくと、橋梁変位振動は(1)式のように求められる。

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^n \phi_k(x) q_k(t) \quad (1)$$

ここで、 n は考慮する最大モード次数である。(1)式より、移動計測点 $x = \tilde{x}(t)$ における橋梁変位は

$$\tilde{y}(t) = \sum_{k=1}^n \phi_k(\tilde{x}(t)) q_k(t) \quad (2)$$

と表される。車上計測点数を $n = 2$ としたとき、等しい数の固定計測点 $x = \hat{x}_1, \hat{x}_2$ における k 次のモード形状関数を A_{jk} として以下のように表す。

$$A_{jk} = \phi_k(\hat{x}_j) \quad (j = 1, 2) \quad (3)$$

つづいて、 $\phi_k(x)$ を内挿によって離散化する。内挿とは、基底関数により連続関数を補間することである。基底関数 $N_j(x)$ ($j = 1, 2, \dots, n$)を用いて、 k 次のモード形状関数 $\phi_k(x)$ は近似的に次式のように表すことができる。

$$\phi_k(x) = \sum_{j=1}^n a_{jk} N_j(x) \quad (4)$$

ここで、基底関数が $N_j(\hat{x}_j) = 1$ 、かつ、 $N_j(\hat{x}_i) = 0$ （ただし、 $i \neq j$ ）となる性質を示すとき、 $a_{jk} = A_{jk}$ である。本研究では、基底関数としてラグランジュ関数を用いた。(5)式にラグランジュ関数 $N_j(x)$ を示す。

$$N_j(x) = \left(\frac{n+1}{L} \right)^{n-1} \prod_{\substack{l=1 \\ (l \neq j)}}^n \frac{x - \hat{x}_l}{\hat{x}_j - \hat{x}_l} \quad (5)$$

ここで、 L は橋長である。固定計測点は、橋梁内のどの点においても仮想できるが、モード形状の直交性を保証しやすいため、橋梁を等間隔に分割する点とする。このとき、近似したモード形状 $\phi_k(x)$ を行列で表すと、

$$\begin{bmatrix} \phi_1(\tilde{x}_1(t)) & \phi_2(\tilde{x}_1(t)) \\ \phi_1(\tilde{x}_2(t)) & \phi_2(\tilde{x}_2(t)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1(\tilde{x}_1(t)) & N_2(\tilde{x}_1(t)) \\ N_1(\tilde{x}_2(t)) & N_2(\tilde{x}_2(t)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

と表すことができる。移動計測点の座標を代入して得られる基底行列を $\mathbf{N}(t)$ 、モード形状行列を $\tilde{\Phi}(t)$ とすると、次式が得られる。

$$\tilde{\Phi}(t) = \mathbf{N}(t)\mathbf{A} \quad (7)$$

ここで、(2)式に(7)式を代入すると

$$\tilde{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{N}(t)\mathbf{A}\mathbf{q}(t) \quad (8)$$

となる。車両後輪が $\mathbf{x}_1$ を通過してから ($t = t_1$)、前輪が $\mathbf{x}_2$ を通過するまで ($t = t_m$) を内挿の定義領域とする。(8)式の両辺に $\mathbf{N}^{-1}(t)$ をかけると、移動計測点での計測値から固定計測点での推定値を求めることができる。

$$\mathbf{N}^{-1}(t)\tilde{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{q}(t) \quad (9)$$

次に、(9)式で求まる固定計測点での推定値を特異値分解し、モード形状を推定する。固定計測点での推定値を m 列並べた行列を $\mathbf{M}(\in \mathbf{R}^{n \times m})$ とすると

$$\mathbf{M} = [\mathbf{N}^{-1}(t_1)\tilde{\mathbf{y}}(t_1) \quad \cdots \quad \mathbf{N}^{-1}(t_m)\tilde{\mathbf{y}}(t_m)] \quad (11)$$

$$\mathbf{M} = [\mathbf{A}\mathbf{q}(t_1) \quad \cdots \quad \mathbf{A}\mathbf{q}(t_m)] \quad (12)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{A}\mathbf{Q} \quad (13)$$

となる。特異値分解は $n \times m$ 行列に対して適用可能であるから、(11)式の $\mathbf{M}$ に対して特異値分解を適用し、

$$\mathbf{M} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (14)$$

と分解できる。ゼロ行列となる部分を省略すると、 $\mathbf{U} (\in \mathbf{R}^{n \times n})$ 、 $\mathbf{V} (\in \mathbf{R}^{n \times m})$ は直交行列（ただし、 $\mathbf{V}^T\mathbf{V} = \mathbf{I}$ 、 $\mathbf{I}$ ：単位行列）、 $\mathbf{\Sigma} (\in \mathbf{R}^{n \times n})$ は特異値を対角成分にもつ対角行列である。また、 $\mathbf{\Sigma}$ の対角成分を大きなものから順に並べると、 $\mathbf{U}$ 、 $\mathbf{\Sigma}$ および $\mathbf{V}$ は一意に求められる。 $\mathbf{U}$ が $\mathbf{A}$ の推定値である。

ここで、(14)式のようにデータ行列 $\mathbf{M}$ に特異値分解を適用したとき、モード形状を正確に推定するためには、橋梁の各次モード形状の直交性と、各次モードの基準座標の無相関性が同時に満たされる必要がある。モード形状は定義により直交性を有するが、橋梁振動は強制加振力（交通荷重）によって励起されているため、必ずしも無相関性を示すとは限らない。そのため、たとえ直接計測した橋梁振動の特異値分解によって推定モード形状 $\mathbf{U}$ を得た場合でも、橋梁のモード形状が精度良く推定できるためには基準座標の無相関性を保証できなければならない。

ところで、特異値分解で得られる推定基準座標 $\mathbf{V}^T$ は無相関なデータ行列に限られるので、実際の基準座標が損傷により局所的に変化した場合であっ

ても、 $\mathbf{V}^T$ は無相関であるという制約によって、損傷変化に正しく追従できないと予想できる。よって、橋梁損傷は基準座標の推定誤差を変化させ、それに合わせて、モード形状の推定精度にも影響を与えられと考えられる。つまり、損傷前後でモード形状の推定精度が変化すると考えられる^[12]。ゆえに、SSMA は損傷に対して、実際のモード形状以上に感度の高い指標となる。

本研究では、車両振動を移動点での橋梁振動と考えることとする。車両振動には路面凹凸の影響が含まれ、その空間周波数特性が走行速度の変化によって異なる周波数特性を示すようになる。よって、検討においては走行速度ばらつきによる路面凹凸の影響変化も考慮する必要がある。

3 実験概要

3.1 模型橋梁および模型車両

容易に反復走行が可能で、さらに損傷模擬と回復もできる模型実験を行う。本実験で用いた模型橋梁と模型車両の外観を図-2、図-3、図-4、図-5、に示す。また橋梁と車両の各パラメータを表-1、表-2 に記載する。

図-2 の模型橋梁は資料^[13]に基づき紙で制作している。橋梁のディテール（主桁・分配横桁・横構・ボルト・補剛板・床板など）を再現している。部材の着脱により、橋梁のディテール損傷模擬が可能となっている。

床板、加速度センサ、感光センサ搭載後の橋梁を図-3 に示す。床版には発泡スチロールを採用し、その表面は路面凹凸を模擬している。床版は橋梁に建材用両面テープで固定した。床板の下に図-3 の通り計6個の加速度センサを設置している。加速度センサはすべてGPS時刻情報を用いて時刻同期を行っている。この加速度センサは起動開始から加速度を絶えず計測し続けるため、橋梁上のデータ区間を特定する必要がある。そこで、橋梁の入口と出口のGPSモジュールに繋いだ感光センサ上を通過した時刻をそれぞれ記録することによって橋梁上の加速度データ区間を特定している。車両速度は、車両長さを出口の感光センサを通り抜けた時間で除した値を用いている。また、橋梁の入り口と出口には助走区間を設けている。

図-4 に模型車両の3D図を示す。車両はアルミで製作し、モータにより自走可能である。図-4 の下部プレートが10mmのアルミ板の状態を重量車、アク

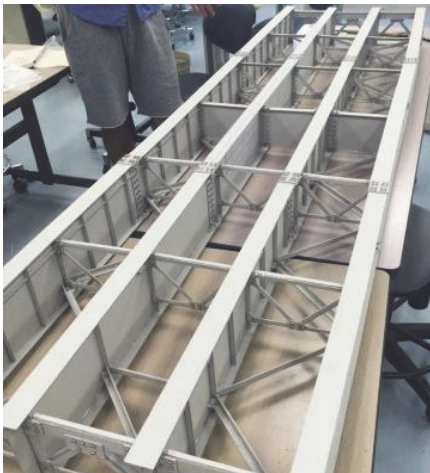


図-2 模型橋梁床板なし

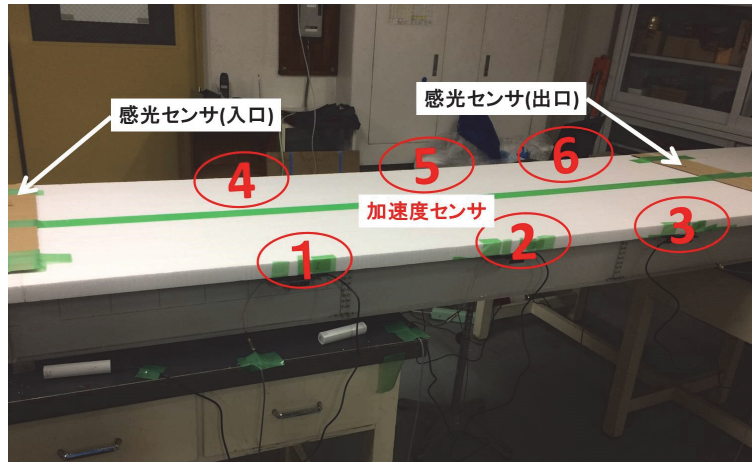


図-3 床板，加速度センサ，感光センサ搭載後の模型橋梁

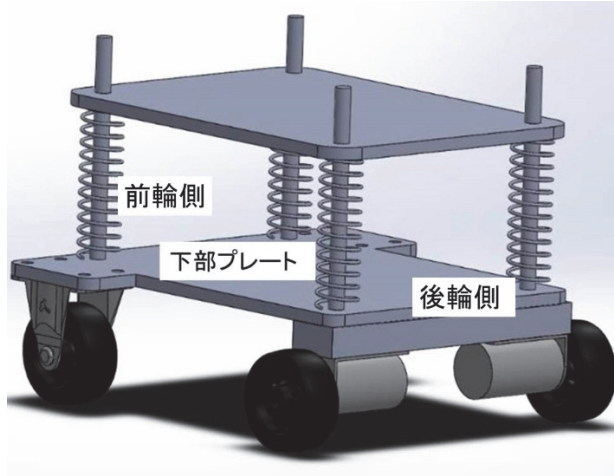


図-4 模型車両の 3D 図

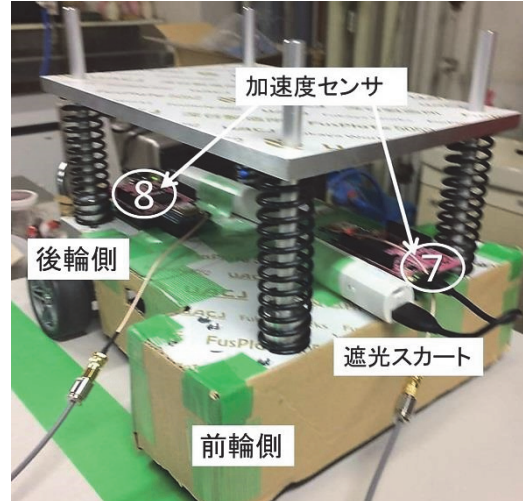


図-5 実際に用いた模型車両

表-1 橋梁のパラメータ

全体寸法	長さ	2.13m
	重さ	5.3 kg
床板	厚さ	30mm
	幅	665mm
	ヤング率	0.076GP
	比重	0.02
	断面二次モーメント	$1.5 \times 10^6 \text{mm}^4$
主要部材	全部材厚	2mm
	ヤング率	0.25GP
	比重	0.66
	主桁断面二次モーメント	$2.66 \times 10^5 \text{mm}^4$

表-2 車両のパラメータ

全体詳細	長さ	270mm
	幅	280mm
	速度	1.03m/s
質量	軽量車	4.0kg
	重量車	5.3kg

リル板に換装したものを軽量車とした。図-5 から加速度センサは車両の前輪と後輪の車軸上に設置している。感光センサの感度を高めるため、遮光スカートを装備している。

使用する加速度センサを位置によって図-3 の番号通り(図の①②③④⑤⑥)とする。車両は実橋梁と同じく左側通行とし、センサ番号 4,5,6 番の車線側を走行する。車両のセンサは前輪側を 7 番とし、後輪側を 8 番とした。

本実験では、SSMA の損傷検知に対する適用性を検討するため、健全時と損傷時で走行実験を行う。損傷ケースとして 4 ケースを実施した。時系列順として図-6 の位置により 3 ケース、最後に分配横桁取り外す 1 ケースとする。最終的な橋梁の状態を確認するため、最後に再度健全で計測を行った。損傷状態は図-5 の横構 1、横構 2、横構 3、および分配横桁 4 を取り外す場合に対し、それぞれケース 1、ケ

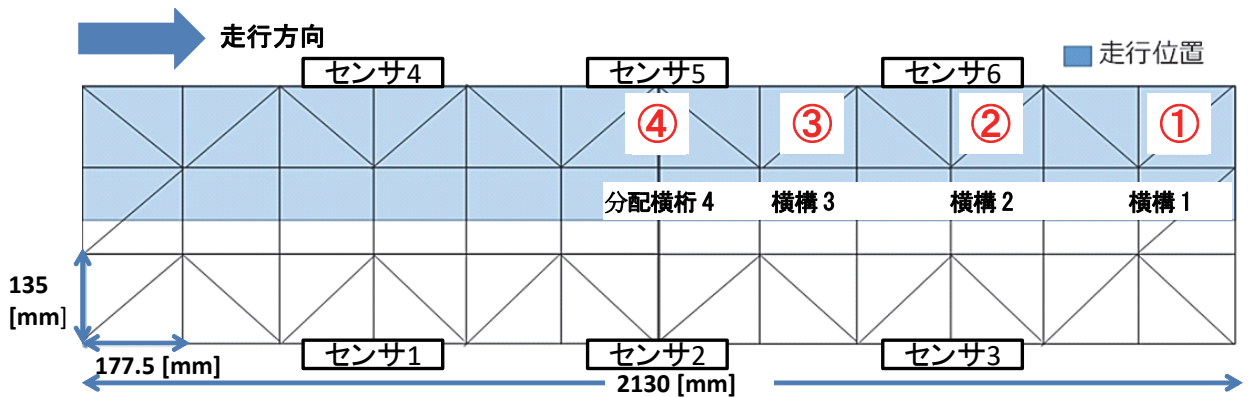


図-6 取り外し位置と走行位置



図-7 横構(左)と分配横桁(右)

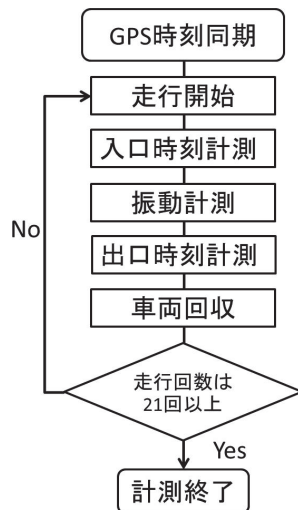


図-8 作業手順フローチャート

ケース 2, ケース 3, ケース 4 とした。図-7 が横構と分配横桁の写真である。図中では横構 1 が外された状態となっている。分配横桁は主桁上に載荷された荷重を複数の桁に分配し、1 つの桁の荷重を減ずる比較的重要な副構造であり、これを取り外すことで

重大損傷を模擬している。また、損傷状態の試験前後に健全データを計測した。これらをそれぞれケース 0, ケース 5 と呼称する。車両は左側を通行するため、部材取り外し位置はすべて走行位置のおおよそ真下にあたる。これらの損傷パターンを軽量車と重量車で走行させる。

3.2 実験手順

今回使用する計測デバイスは約 13 分間記録可能である。この 13 分間に 21 回走行したものを 1 サイクルとし、各ケースについて 5 サイクル繰り返し計 105 回計測する。健全、損傷で合計 6 ケースあるので、630 回走行する。重量車の計測終了後に車両の下部プレートをアルミ板からアクリル板に交換し、軽量車で同様に走行試験を行う。

図-8 に作業手順フローチャートを示す。まず、すべての加速度センサが GPS 時刻情報を取得後、車両の走行を開始する。助走区間から橋梁に差し掛かると感光センサによって車両が橋梁へ進入した時刻が記録される。橋梁上で加速度センサが車両振動と橋梁振動を計測する。橋梁から出る際にも感光センサ

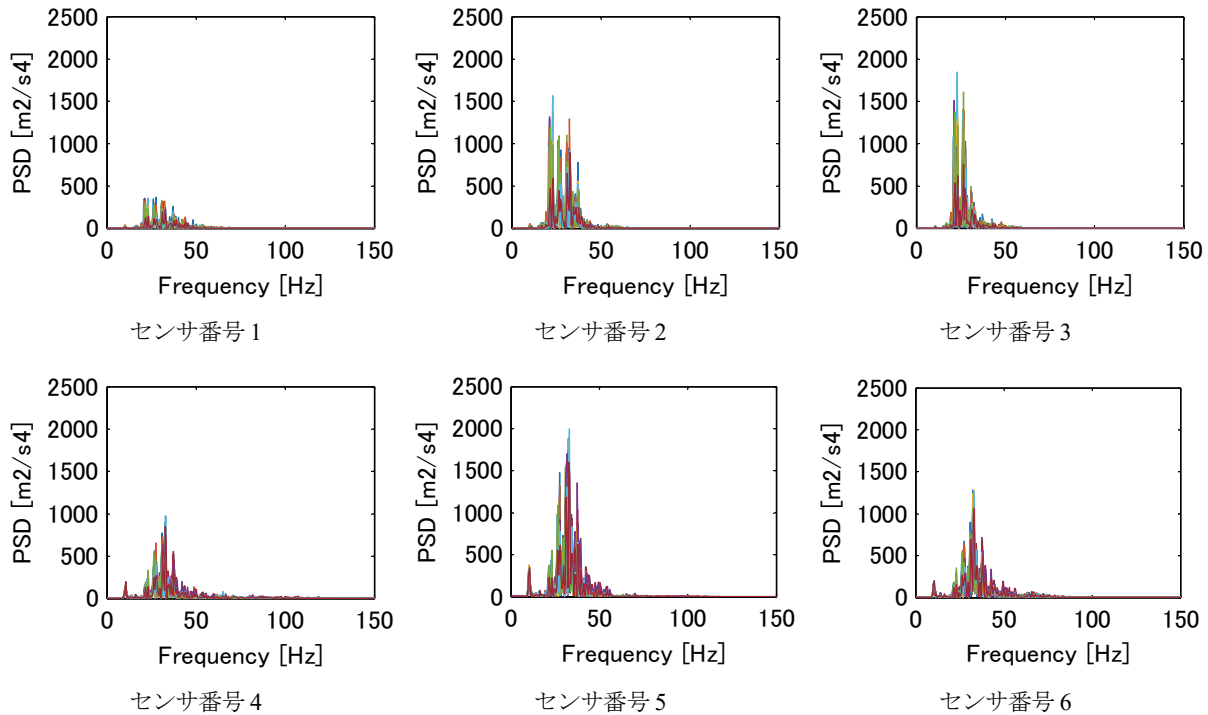


図-9 健全時の橋梁パワースペクトル密度

が橋梁から出た時刻を記録する。走行回数が 21 回まで繰り返し計測する。この 1 サイクルを各パターン 5 回で計 105 回走行する。

速度センサから得られた加速度応答に対してフーリエ変換を行う。図-9 にパワースペクトル密度を示す。図の上段左からセンサ番号 1,2,3 番, 下段左からセンサ番号 4,5,6 番の加速度センサに対応している。

図-9 より各センサで 25~50Hz でスペクトルが大きく出ており固有振動数はおおむねこの範囲内であると考えられる。

4 実験結果と考察

4.1 橋梁の固有振動数

本実験で使用した紙製模型の振動特性を調べるため固有振動数を算出する。橋梁に設置した 6 つの加

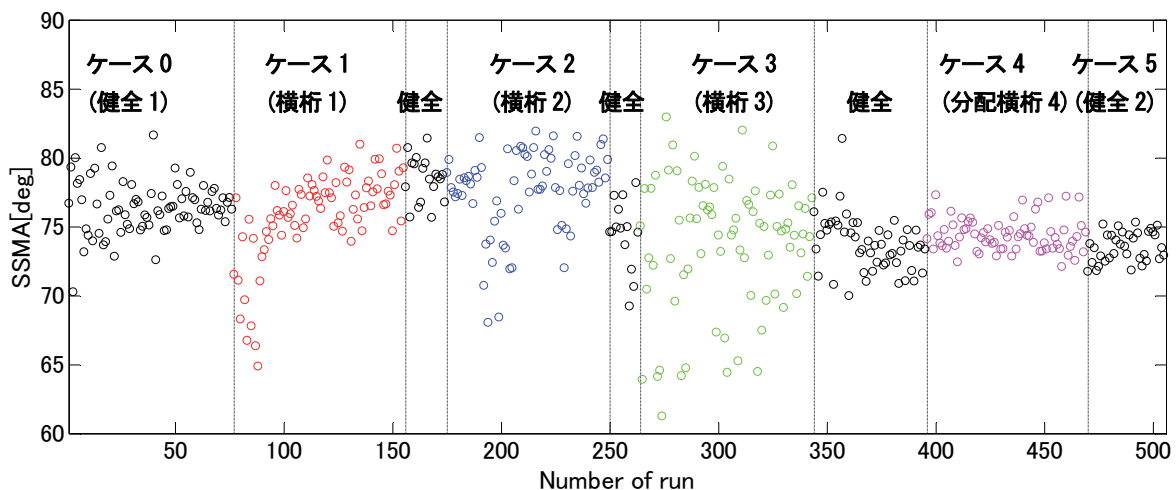


図-10 重量時の各損傷パターン別 SSMA

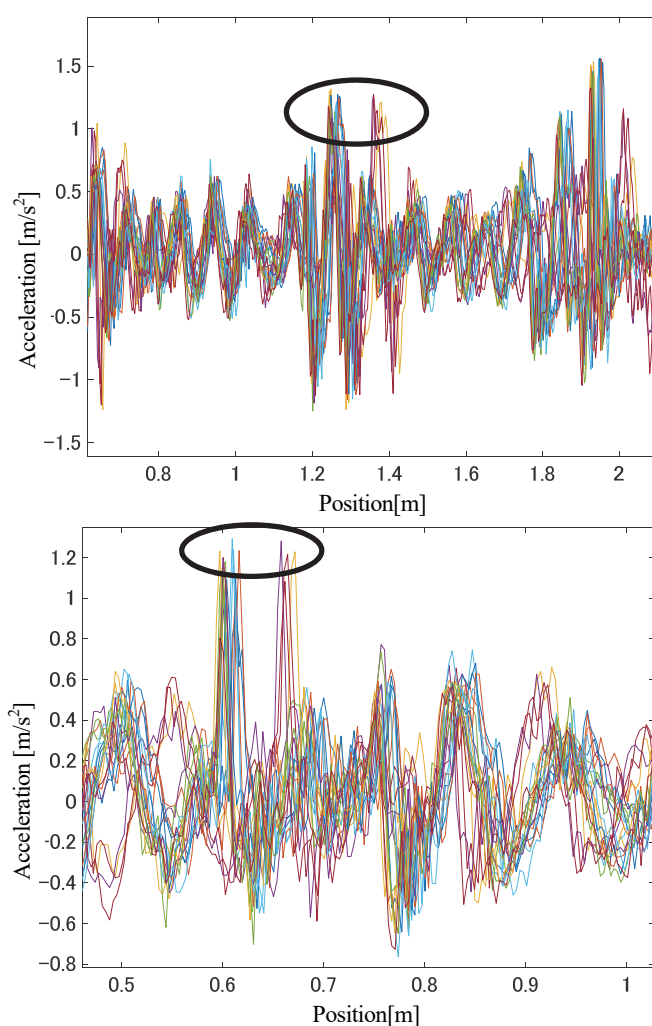


図-11 重量時4回目健全時の加速度と車両走行位置との関係

表-3 重量車両走行時4回目健全時のSSMAと速度

回数	SSMA	V[m/s]
1	76.072	1.005
2	73.374	1.005
3	77.596	1.089
4	71.406	1.005
5	74.408	1.005
6	77.498	1.005
7	79.206	1.089
8	75.218	1.005
9	74.742	1.005
10	75.153	1.001
11	83.092	1.085
12	75.336	1.001
13	70.806	1.001
14	79.867	1.085
15	75.394	1.001
16	75.098	1.001
17	77.199	1.001
18	74.597	1.001
19	75.906	1.001

4.2 走行実験結果

重量車でのSSMAを図-10に示す。縦軸がSSMA[deg]、横軸が実験回数であり時系列順に右並びとしている。最初の黒がケース0、赤がケース1、青がケース2、緑がケース3、ピンクがケース4、最後の黒はケース5を示している。図-10より分散が大きく、明らかに外れた値があることが確認できる。図-11は、4回目健全時における車両に搭載した加速度センサから得られた加速度と走行位置を表した図である。図-11の(1)が前輪位置、(2)が後輪位置の加速度センサから得られた波形である。図より、加速度波形の車両走行位置方向のずれが確認できる。図-11の車両走行位置は橋梁上の経過時間に車両速度を乗じたものである。即ち、計測した車両速度の誤差が波形のずれの原因のひとつであると考えられる。また本実験では、車両速度として車両長さを出口の

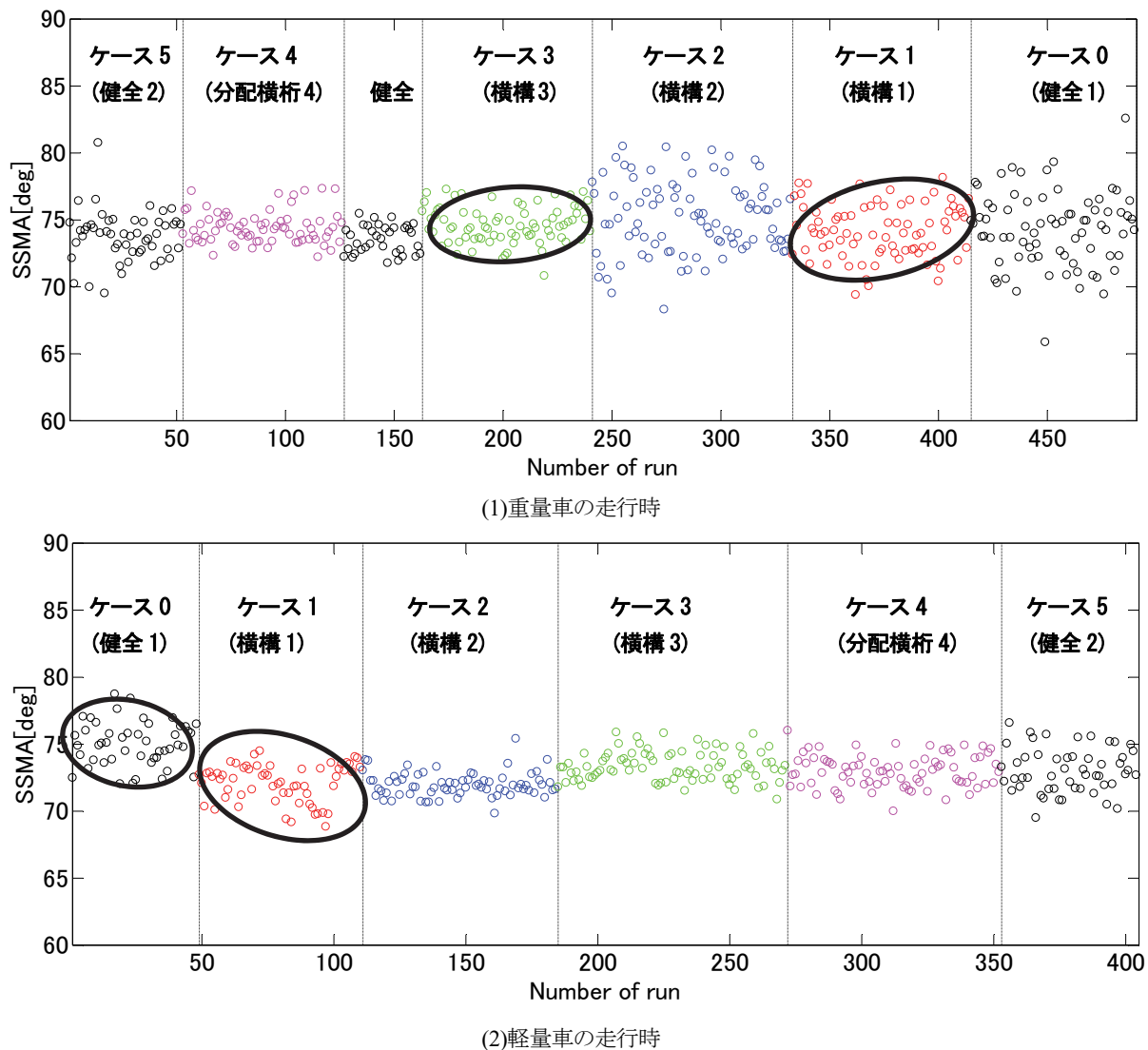


図-12 SSMA のグラフ(上. 重量時 下. 軽量時)

感光センサを通り抜けた時間で除した値を用いている。車両が感光センサ上を直進して通過すれば的確な速度が計測されるが、そうでない場合は速度が正確に計測されない。実際、表-3 の重量時 4 回目健全時の SSMA と速度の関係を見ると、3 回目、7 回目、11 回目、14 回目は速度が速く、その時の SSMA は他とは違う値を出している。これより、速度の測定の誤差は車両走行位置の算出に影響を与え、SSMA に影響を及ぼすことが分かる。よって速度の誤計測値を除去するため、走行速度の平均から分散の範囲内で抑えることで速度データを補正する必要があると考えられる。

実験中に車両が直進しなくなり、図-10 のケース

3 計測後に、車両の車軸が曲がる故障が判明した。よって 3 抜きまでのデータは車両故障時のデータであると考え、修繕後の健全、横桁抜きのデータの続きから計測再開した。これにより、計測順はケース 5→ケース 4→ケース 3→ケース 2→ケース 1→ケース 0 と当初とは逆順で新たに走行し直した。軽量時は最初の重量時と同じくケース 0→ケース 1 …の順で走行した。また、共に速度平均を取り、速度が分散の範囲外にあたるデータを除外した。その結果を図-12 に示す。(1)が重量時で、(2)が軽量時のグラフである。各ケース 105 回計測しているが、速度のばらつきが大きいものを除外している。図-12 より、同一ケース内でも実験回数が増えるにつれ、データが

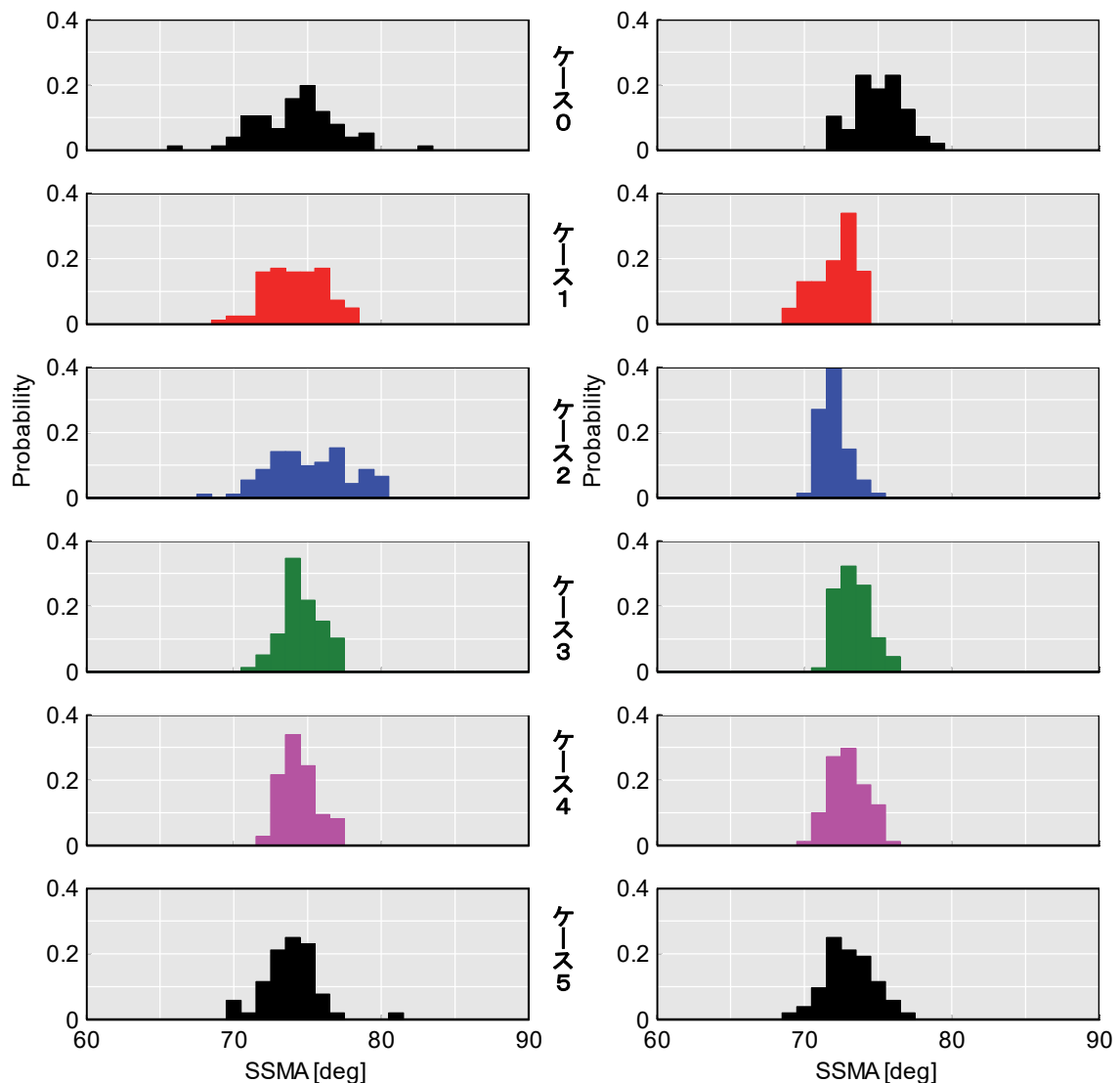


図-13 トレンド除去後の SSMA ヒストグラム (左. 重量時 右. 軽量時)

変化しているケースが確認できる。要因として部材を外す際の床版や部材の損傷、走行に起因する疲労などが考えられる。また、橋梁と床板を固定するテープが部材取り外し時に剥がれ、走行によって固定状態が変化していることが予想される。いずれにせよ繰り返し走行や橋梁の固定状態の変化が実験環境の変化を招き、SSMA に影響したと考えられる。そこで各損傷パターンの変動を明らかにするため時間変化によるトレンドを除去したヒストグラムを図-13 に示す。SSMA を同一ケースで比較したものを図-14 に掲載する。重量は軽量時と同じ順番に揃えるため、ケース 0→ケース 1…の順番に入れ替えて比較した。図-13 より重量時において分散が大きいことが確認できる。図-13 および図-14 から健全時は重

量車と軽量車の場合で値が一致し、損傷時は離れる傾向が確認できる。また、平均、分散などの各種統計量を図-15 にまとめた。図-15 から平均のグラフから各ケースで値の変化が大きく、軽量がより敏感に損傷に反応している。尖度を除く諸統計量において重量車がおおむね大きい値を出している。また、同一条件であるはずの健全 1 と健全 2 で大きく差が出ている。これは予想に反しており今後、さらなる検証が必要である。また、軽量時のいずれの統計量においてもケース 2 で健全との差が最大である。ケース 2 が平均値と分散では最小値であるのに対し、歪度と尖度では最大値である。対照的に重大損傷を模擬したケース 4 では全統計量において比較的大きな差が見られなかった。以上から、軽量時は損傷に対

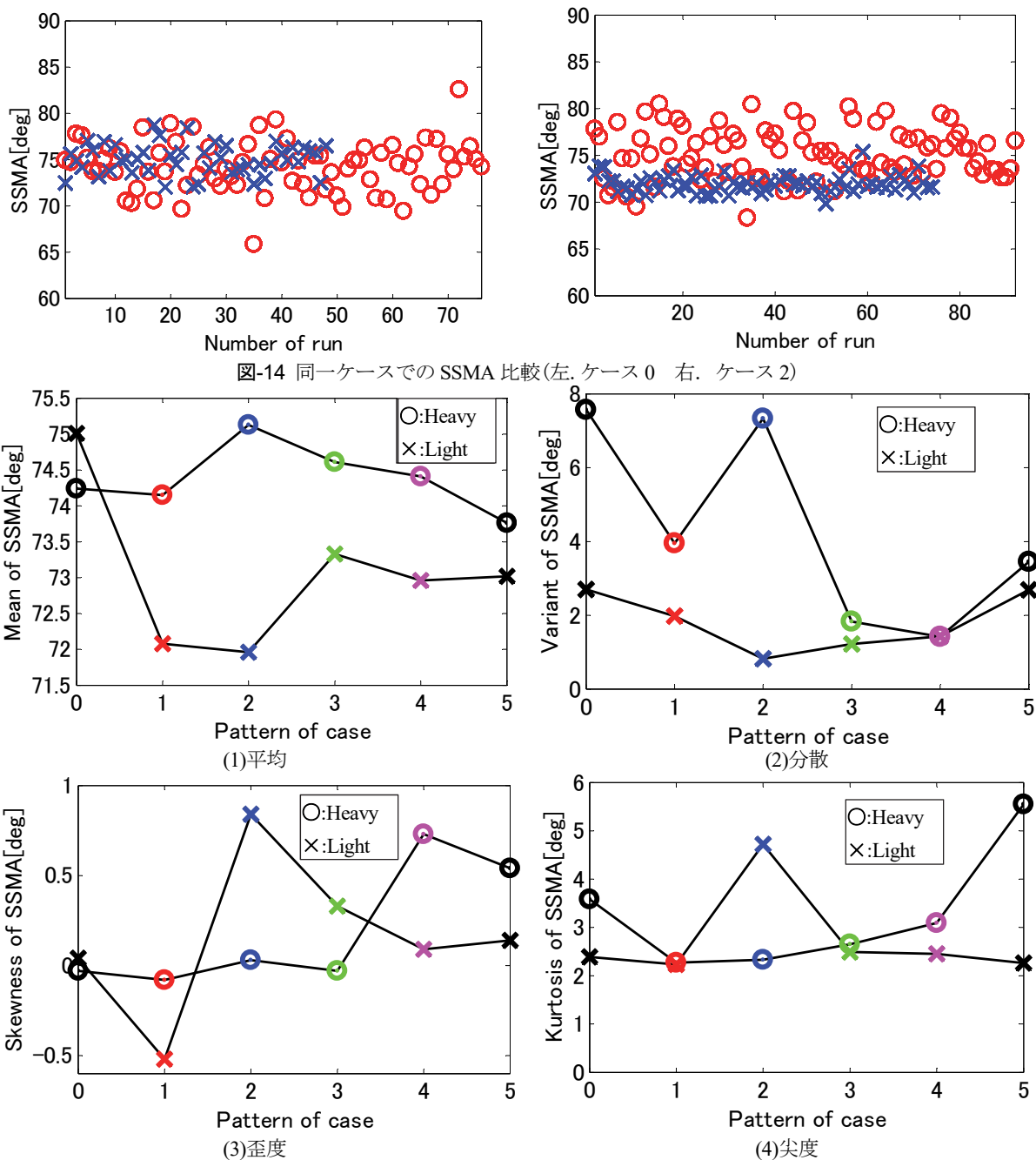


図-15 各種統計量

する感度が高く、特にケース2の際に顕著である。重量時は床板の固定が甘く、床板まで損傷影響が伝達しなかった可能性がある。

次に本試験結果の妥当性を確認するため、ウェルチのt検定を行った。ウェルチのt検定は各ケースに等分散性が成り立たない場合でも適用可能である。その結果を表4に示す。今回データはおおむね正規分布に従っていると仮定している。ウェルチのt検定について有意水準 α を0.1%としたとき健全1、健

全2以外の損傷時の有意確率 $Pr\{|T| \geq t_0\}$ はすべて α を下回っている。このことから健全時の平均値は軽量車と重量車の場合で有意な差が見られないが、一方で損傷時には平均値に有意な差が見られることが分かった。次に同一車両においての健全1、健全2に対して検定を行った。同じ車両で同じ健全状態であれば平均に有意な差が見られないはずである。重量時の有意確率 $Pr\{|T| \geq t_0\}$ は α を下回り、平均値に有意な差が見られなかったが、軽量時は α を下回り平均

表-4 ウェルチのt検定の結果

	健全 1	横構 1	横構 2
自由度	122	141	115
T	-1.95	7.30	10.53
$Pr\{ T \geq t_0 \}$	0.053	1.92×10^{-11}	1.45×10^{-18}
	横構 3	分配横桁 4	健全 2
自由度	149	152	100
T	6.60	7.51	2.13
$Pr\{ T \geq t_0 \}$	6.75×10^{-10}	4.75×10^{-12}	0.035
	重量健全	軽量健全	
自由度	126	97	
T	1.18	6.04	
$Pr\{ T \geq t_0 \}$	0.24	2.85×10^{-8}	

値に有意な差が認められた。よって、軽量時は健全 1 と健全 2 は違う状態と考えられる。この実験では重量車を走行させてから軽量車を走行させるまでにタイムギャップがあり、軽量車走行時の健全 2 では疲労破壊が進行した可能性がある。また、予想では重量車のほうが損傷影響の卓越により SSMA の変化が大きいと考えたが、軽量車のほうが損傷ケースによっては平均値の変化が大きい。これは、重量時は床板の固定が弱く、床板の振動が橋梁振動に大きく出ることによって橋梁の損傷影響が卓越しなかった、あるいは重量時に分散が大きくなったことが原因と推察される。したがって、重量車と軽量車の SSMA に差が出る傾向が見られたものの、実験環境を整えた上で、さらなる再検証が必要である。

まとめ

本研究では、2 種類の車両を用いた車両走行実験により、SSMA に基づく橋梁健全性評価の可能性を検討した。以下に本実験から得られた知見を記す。

- (1) 同一損傷ケースでも時系列順に SSMA が変化した。これは部材取り外し時の床板損傷や走行による橋梁損傷によるものと考えられる。
- (2) t 検定により軽量重量で損傷時 SSMA の平均値に有意な差が見られた。しかし、軽量時の最初と最後の健全時の SSMA の平均値に有意な差が出ており実験環境が変化していることが示唆された。

- (3) 健全時と損傷時では重量車のほうが振動に損傷影響が卓越するはずであったが軽量時のほうが SSMA の差が損傷ケースごとに顕著であった。SSMA は損傷時で異なる値が出ていることから損傷検知はできていることが確認できる。2 種類の重量軽量の車両で SSMA の差は見られたが、橋梁損傷等、実験環境の変化もあり不明瞭で損傷判定は出来ない。

今後の課題としては軽量時をより軽く、重量時をより重くし、損傷がより橋梁振動に卓越する様にする、部材取り外し時に床版を外さず完全固定し床板振動の影響を軽減する等が挙げられる。走行順を重量車と軽量車を交互に走行させ走行環境を一致させる必要もある。また、橋梁自体が度重なる実験によって損傷しているとも考えられ、新しく作り直す必要もある。これらを考慮し実験環境を再調整の上、今後検討していく予定である。

参考文献

- [1] 国土交通省：道路の老朽化対策，道路構造物の現状(橋梁)
- [2] 国土交通省：道路の老朽化対策，老朽化対策の取組み
- [3] 山本亨輔，大島義信，金哲佑，杉浦邦征：車両応答データの特異値分解による橋梁損傷検知技術の提案と検討，構造工学論文集，Vol.59A，pp.320-331，2013.
- [4] 山本亨輔，大島義信，杉浦邦征，河野広隆：車両応答分析に基づく橋梁モード形状推定手法の開発，土木学会論文集，土木学会論文集 A1，Vol.67，pp.242-257，2011.
- [5] Toshinami, T., Kawatani, M. and Kim, C.W. : Feasibility investigation for identifying bridges fundamental frequencies from vehicle vibrations, Bridge maintenance, safety, management and life-cycle optimization, IABMAS 2010, pp.317-322, 2010.
- [6] Ling, C. W. and Yang, Y. B. : Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification, Engineering Structures, Vol.27, pp.1865-1878, 2005.
- [7] Y.B. Yang, K.C. Chang: Extracting the bridge frequencies indirectly from a passing vehicle :

Parametric study, Engineering Structure, Vol.31, pp.2448-2459, 2009

- [8] Y.B. Yang, K.C. Chang: Extraction of bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle enhanced by the EMD technique, Journal of Sound and Vibration, Vol.322, pp.718-739, 2009
- [9] 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 加賀山泰一: 橋梁の損傷評価における力学的挙動の有効性, 土木学会論文集, 第 380 号/I-7, pp.355-364, 1987.
- [10] 山本亨輔, 伊勢本遼, 大島義信, 金哲佑, 杉浦邦征: 鋼トラス橋の部材破断が橋梁および走行車両の加速度応答に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.180-193, 2012
- [11] 中釜祐太: 模型桁実験による車両応答を用いたモード形状推定法の桁損傷検知への適用性に関する検討, 筑波大学理工学群工学システム学類卒業論文, 2014.
- [12] 石川幹生: 車両応答分析を用いた橋梁損傷検知手法における車両特性の影響, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2017
- [13] 原隆, 山口隆司, 北原武嗣, 和多田康男: 鋼構造学, 環境・都市システム系教科書シリーズ 15, コロナ社, pp197-202, 2007

謝辞

本研究に際して、丁寧なご指導をいただきました山本亨輔先生、ゼミで貴重なご指摘、アドバイスをいただきました松島亘志先生に深謝いたします。また実験に関して協力いただいた高橋先輩をはじめとする山本研の先輩方、技官の方々にも深くお礼申し上げます。そして大学での研究を支えてくれた家族に心から御礼を申し上げます